



**University of
Zurich^{UZH}**

**Zurich Open Repository and
Archive**

University of Zurich
University Library
Strickhofstrasse 39
CH-8057 Zurich
www.zora.uzh.ch

Year: 2012

Intraoperatives Neurophysiologisches Monitoring verbessert das Outcome in der Neurochirurgie

Sarnthein, J ; Krayenbühl, N ; Actor, B ; Bozinov, O ; Bernays, R

Abstract: Zusammenfassung: Das Intraoperative Neurophysiologische Monitoring (IONM) identifiziert eloquente Areale oder Nervenbahnen im Operationsgebiet und überwacht ihre Funktion. Inzwischen ist IONM zu einem wichtigen Hilfsmittel in der Neurochirurgie geworden. 1.IONM erhöht die Sicherheit während der Operation. Die Identifikation neuronaler Strukturen kann nicht nur postoperative neurologische Ausfälle vermeiden helfen, sondern auch die Operationszeit verkürzen. 2.IONM kann zur vollständigeren Entfernung von Tumoren beitragen und somit die Überlebensdauer der Patienten verlängern. 3.Komplizierte neurochirurgische Eingriffe, welche mit einem erhöhten Risiko von neurologischen Ausfällen behaftet sind, werden durch IONM erst ermöglicht. Das IONM umfasst eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren, die bei fachgerechter Auswahl das Outcome nach neurochirurgischen Eingriffen erwiesenermassen erhöhen. **Abstract:** Intraoperative Neurophysiological Monitoring (IONM) identifies eloquent areas or nerves fibers during neurosurgical interventions and monitors their function. For several interventions IONM has become mandatory in neurosurgery. IONM increases patient safety during surgery as the risk of neurological deficits is reduced. Safer surgery reduces the time needed for the intervention and thereby reduces risk. IONM contributes to complete resection of tumors, which in turn prolongs patients' survival. Complicated surgical interventions associated with an elevated risk of neurological deficits have only become possible due to IONM. IONM comprises a variety of procedures that are selected for a particular intervention. With appropriate selection of the procedures IONM has been shown to improve neurological and functional outcome after neurosurgical interventions.

DOI: <https://doi.org/10.1024/1661-8157/a000817>

Other titles: Intraoperative neurophysiological monitoring improves outcome in neurosurgery

Posted at the Zurich Open Repository and Archive, University of Zurich

ZORA URL: <https://doi.org/10.5167/uzh-58406>

Journal Article

Accepted Version

Originally published at:

Sarnthein, J; Krayenbühl, N; Actor, B; Bozinov, O; Bernays, R (2012). Intraoperatives Neurophysiologisches Monitoring verbessert das Outcome in der Neurochirurgie. *Praxis*, 101(2):99-105.

DOI: <https://doi.org/10.1024/1661-8157/a000817>

Herkunft der Arbeit:

Klinik für Neurochirurgie, UniversitätsSpital, CH-8091 Zürich

Autoren:

J. Sarnthein, N. Krayenbühl, B. Actor, O. Bozinov, R. Bernays

Haupttitel:

Intraoperatives Neurophysiologisches Monitoring verbessert das Outcome in der Neurochirurgie

Englischer Titel:

Intraoperative Neurophysiological Monitoring Improves Outcome in Neurosurgery

Zusammenfassung

Das Intraoperative Neurophysiologische Monitoring (IONM) identifiziert eloquente Areale oder Nervenbahnen im Operationsgebiet und überwacht ihre Funktion. Inzwischen ist IONM zu einem wichtigen Hilfsmittel in der Neurochirurgie geworden.

1. IONM erhöht die Sicherheit während der Operation. Die Identifikation neuronaler Strukturen kann nicht nur postoperative neurologische Ausfälle vermeiden helfen, sondern auch die Operationszeit verkürzen.
2. IONM kann zur vollständigeren Entfernung von Tumoren beitragen und somit die Überlebensdauer der Patienten verlängern.
3. Komplizierte neurochirurgische Eingriffe, welche mit einem erhöhten Risiko von neurologischen Ausfällen behaftet sind, werden durch IONM erst ermöglicht.

Das IONM umfasst eine Vielzahl von verschiedenen Verfahren, die bei fachgerechter Auswahl das Outcome nach neurochirurgischen Eingriffen erwiesenermassen erhöhen.

Schlüsselwörter:

Neuromonitoring; Sensorisch Evozierte Potentiale; Motorisch Evozierte Potentiale; Direkte Kortikale Stimulation; Direkte Nervenstimulation

Summary

Intraoperative Neurophysiological Monitoring (IONM) identifies eloquent areas or nerves fibers during neurosurgical interventions and monitors their function. For several interventions IONM has become mandatory in neurosurgery.

1. IONM increases patient safety during surgery as the risk of neurological deficits is reduced. Safer surgery reduces the time needed for the intervention and thereby reduces risk.
2. IONM contributes to complete resection of tumors, which in turn prolongs patients' survival.
3. Complicated surgical interventions associated with an elevated risk of neurological deficits have only become possible due to IONM.

IONM comprises a variety of procedures that are selected for a particular intervention. With appropriate selection of the procedures IONM has been shown to improve neurological and functional outcome after neurosurgical interventions.

Key words:

Neuromonitoring; Sensory Evoked Potentials; Motor Evoked Potentials; Direct Cortical Stimulation; Direct Nerve Stimulation

Résumé

Le monitoring neurophysiologique peropératoire (MNIO) permet d'identifier et de surveiller les fonctions d'aires éloquentes ou de fibres nerveuses au cours d'interventions neurochirurgicales. Pour plusieurs interventions, le MNIO est devenu obligatoire pour la neurochirurgie.

1. le MNIO augmente la sécurité du patient pendant l'intervention chirurgicale et réduit le risque de déficits neurologiques. Une chirurgie plus sûre réduit le temps nécessaire à l'intervention et réduit ainsi les risques.
2. Le MNIO contribue à compléter la résection de tumeurs, qui à son tour prolonge la survie des patients.
3. Des interventions chirurgicales complexes, associées à un risque élevé de déficits neurologiques, sont devenues possibles par l'utilisation du MNIO.

Le MNIO comprend une variété de procédures qui sont adaptées à chaque intervention particulière. Avec un choix approprié des procédures de MIO, il a été montré que les résultats neurologiques et fonctionnels après les interventions neurochirurgicales ont été améliorés.

Mots clés:

Neuromonitoring; potentiels évoqués sensoriels; potentiels évoqués moteurs;
Stimulation corticale directe; stimulation nerveuse directe

Einleitung

Das Intraoperative Neurophysiologische Monitoring (IONM) wird bei vielen neurochirurgischen Operationen eingesetzt [1-3]. Ziel ist es jeweils, mechanische oder vaskuläre Schäden frühzeitig in einem reversiblen Stadium zu erkennen, damit permanente Schäden durch entsprechende Gegenmassnahmen seitens des Operators vermieden werden können. Auf diese Weise erhöht IONM die Sicherheit während der Operation.

In der Hirntumorchirurgie soll mithilfe des IONM auch eine möglichst vollständige Resektion erreicht werden. Denn häufig ist bei Tumoren die neurochirurgische Entfernung von Tumormasse ein entscheidender Schritt. Für mehrere Hirntumorentitäten konnte man zeigen, dass der Resektionsgrad sowohl mit dem Gesamtüberleben als auch mit dem progressionsfreien Überleben signifikant assoziiert ist [4-9]. Besonders bei Glioblastomen wurde die Auswirkung der radikalen Resektion auf das onkologische Outcome eindrücklich gezeigt [6]. Die Anzahl Überlebender bei 121 Patienten mit unvollständiger Resektion nach 2 Jahren betrug 4 Patienten (3%), hingegen bei 122 Patienten mit totaler Resektion immerhin 19 Patienten (16%).

Andererseits spielt das neurologische Outcome für die Lebensqualität des Patienten nach der Operation eine grosse Rolle. Deswegen müssen bei maximaler Tumorsektion der umliegende eloquente Kortex oder die Faserbahnen geschont werden um neurologische Ausfälle zu vermeiden und dem Patienten eine hohe Lebensqualität zu sichern. In diesem Fall muss der Operateur fortlaufend zwischen maximaler Resektion und dem Erhalt der neurologischen Funktion abwägen. Bei diesem Entscheidungsprozess, sowohl in der Pädiatrischen- als auch in der Erwachsenen Chirurgie, ist das IONM für den Neurochirurgen ein wichtiges Hilfsmittel [1-3, 10].

Eine kürzlich erschienene Arbeit konnte sogar den Nutzen von IONM direkt nachweisen [7]. Die Autoren haben 171 Resektionen von Gliomen untersucht. Nach Operationen, in denen IONM eingesetzt wurde, lag der Anteil an Totalresektionen bei 73%, nach den Operationen ohne IONM bei 40%. Die Aussage zugunsten von IONM ist vielleicht nicht ganz so klar, weil auch andere technische Hilfsmittel wie fMRI und Neuronavigation gemeinsam mit IONM eingesetzt wurden. Aber die 5-Jahres Überlebensrate lag ohne IONM bei 12% und mit IONM schon bei 47%, wesentlich höher. Ähnliche Verbesserungen wurden auch bei der Behandlung von spinalen Tumoren festgestellt [11].

Auch bei cerebrovaskulären Eingriffen wird das IONM eingesetzt, wenn motorisch eloquente Areale betroffen sind. Dazu gehört die Extirpation von Cavernomen und auch die mikrochirurgische Versorgung von Aneurysmen. Häufig ist eine temporäre Okklusion

der zuführenden Gefässe nötig um den Hals des Aneurysmas zu präparieren. Auch bei kurzen Okklusionszeiten kann es zu Minderdurchblutung von Hirnarealen kommen, weshalb die frühe Detektion von ischämischen Ereignissen essentiell ist um neurologischen Defiziten vorzubeugen [12, 13].

Das IONM umfasst eine Vielzahl von Verfahren, aus denen für die jeweilige Operation gezielt ausgewählt werden muss [1-3]. Diese Verfahren lassen sich in zwei grosse Gruppen zusammenfassen: 1) Das eigentliche Monitoring, bei dem die Funktion der Nervenbahnen kontinuierlich überwacht wird, und 2) das Mapping, bei dem kritische Strukturen des Nervensystems direkt identifiziert werden.

Monitoring: Verfahren des IONM zur kontinuierlichen Überwachung der Funktion

Bei der ersten Gruppe von Verfahren, dem eigentlichen Monitoring, wird die Funktion der Nervenbahnen kontinuierlich überwacht [12, 14-20]. Die Messungen werden jeweils sofort ausgewertet, indem sie mit den Ausgangswerten zu Beginn der Operation verglichen werden (Abbildung 1). So kann das IONM in den kritischen Phasen der Operation für den Operateur unmittelbare Entscheidungshilfen bieten [21].

Sensorisch Evozierte Potentiale (SEP) – aufsteigende Bahnen

Die intraoperative SEP-Messung dient zur quantitativen Funktionsüberwachung des somatosensorischen Systems. Zur globalen Funktionsüberwachung werden die Armnerven stimuliert, üblicherweise der N. medianus (**Abb. 2**). Je nach Ort des operativen Eingriffes werden auch die Beinerven stimuliert, üblicherweise der N. tibialis. Dies zum Beispiel bei spinalen Eingriffen oder bei Operationen im Interhemisphärenspalt. Die Reizantworten werden mit Elektroden über dem somatosensorischen Kortex abgeleitet.

Mittels SEP können auch Aussagen über mechanische Belastungen des Gewebes und die ausreichende Hirndurchblutung getroffen werden. **Abb. 2C** zeigt die Abnahme der SEP-Amplitude infolge einer Durchblutungsstörung am Hirnstamm innert weniger Minuten. Eine Amplitudenreduktion auf weniger als 50% des Ausgangswertes wird als kritisch angesehen. Die SEP normalisierten sich nachdem die Durchblutungsstörung behoben werden konnte. Um potentiell schädigende Ereignisse im Operationsverlauf frühzeitig zu erkennen, werden zusätzliche Analysemethoden entwickelt und evaluiert [14]. Weiterhin ist zu bedenken, dass nicht jede Abnahme der SEP-Amplitude eine klinisch manifeste Ischämie anzeigen muss, aber auch nur jene Ischämien detektiert werden können, für welche das gewählte SEP-Verfahren geeignet ist [12].

Akustisch Evozierte Potentiale (AEP)

Die intraoperative AEP-Messung konzentriert sich auf die Überwachung der nach akustischer Stimulation im Hirnstamm generierten Potentiale. Eine Latenzverlängerung dient als erster Hinweis auf eine mögliche Schädigung der Hörbahn. Diese Funktionsüberwachung ist zum einen bei der Resektion von Vestibularis-Schwannomen nötig. Zum anderen kann es Vorkommen, dass bei Eingriffen am Kleinhirnbrückenwinkel durch die Retraktion des Kleinhirns der 8. Hirnnerv mechanisch überdehnt wird. Schliesslich können lokale Durchblutungsstörungen die Funktion der Hörbahn beeinträchtigen. Deswegen werden die AEP auch bei Eingriffen am Hirnstamm routinemässig monitorisiert.

Visuell Evozierte Potentiale (VEP)

Mit der Verfügbarkeit von leuchtstarken Leuchtdioden (LED) ist eine stabile Stimulation der Sehbahn möglich geworden [22]. Diese Messung kommt bei allen Operationen zum Einsatz, bei welchen Auswirkungen auf die Sehbahn als Komplikationen auftreten können.

Motorisch Evozierte Potentiale (MEP) – descendierende Bahnen

Die intraoperativen MEPs dienen zur Überwachung der Muskelaktivität bei Eingriffen an der motorischen Hirnrinde, der Pyramidenbahn, der Hirnnerven oder des Rückenmarks [17, 23-25]. Durch Stimulation des motorischen Kortex werden im Rückenmark messbare Potentiale und Muskelbewegung hervorgerufen [26, 27]. Je nach Art des Eingriffs werden die Muskeln der Arme, der Beine oder des Gesichts überwacht. **Abb. 3** zeigt schematisch die Stimulation auf der Kopfhaut (transkranielle elektrische Stimulation, TES) und MEP-Antworten. Beim Ligieren eines Giant-Aneurysmas führten das temporäre Clipping zum Abflachen der MEP-Antworten (**Abb. 3D**), Warnung, und Reaktion des Neurochirurgen [13]. Falls sich das Operationsfeld in der Zentralregion befindet, kann der motorische Kortex mittels Elektroden subdural stimuliert werden (direkte kortikale Stimulation, DCS, [17]).

Die MEP-Antworten zeigen eine wesentlich grössere Variabilität als die SEP-Wellen. Deswegen gibt es kein allgemein anwendbares Kriterium, welche intraoperative MEP-Veränderung eine mögliche Schädigung der Funktion anzeigt. Bei spinalen Eingriffen gilt ein durchgängiges MEP - auch mit stark reduzierter Amplitude - als gute Prognose für postoperativ erhaltene Muskelkraft [28]. Bei intrakraniellen Eingriffen wird schon eine Amplitudenreduktion als Warnzeichen angesehen [18]. Bei Eingriffen am Hirnstamm werden optimale Warnkriterien noch diskutiert [19, 20, 29].

Mapping: Verfahren des IONM zur direkten Identifikation kritischer Strukturen

Bei der zweiten Gruppe von Verfahren, dem Mapping oder Kartieren, stimuliert der Operateur das Gewebe im Operationsgebiet um kritische Strukturen des Nervensystems zu identifizieren. Insbesondere zählen dazu motorisch eloquente Strukturen im motorischen Kortex, der Pyramidenbahn, der Stammganglien, des Hirnstammes und des Rückenmarks.

Lokalisierung des motorischen Kortex

Bei Eingriffen in der Zentralregion wird die motorische Rinde mittels direkter kortikaler Stimulation (DCS) lokalisiert. Hierzu führt der Chirurg entweder eine Hand-Elektrode oder er platziert eine Streifenelektrode wie sie auch bei präoperativen Abklärungen in der Epilepsiechirurgie üblich ist. Die Stimulation erfolgt unipolar mit der Anode nach dem Train-of-Five Schema [30]. Unsachgemäße Anwendung von DCS kann zu epileptischen Krämpfen führen. Allerdings liegt das Auftreten von Krämpfen bei Anwendung von modernen Stimulationsprotokollen im niedrigen Prozentbereich [31].

Falls nötig, wird vorgängig der zentrale Sulcus mittels Phasenumkehr-SEP lokalisiert. Wird die Reizantwort des Medianus-SEP vom postzentralen Gyrus abgeleitet, so entspricht die Form wie in **Abb. 2** angegeben. Bei Ableitung vom präzentralen Gyrus ist die Form der Reizantwort invertiert. Der Übergang zwischen den beiden Formen der Antwort zeigt den Sulcus centralis an [32].

Als Antwort auf DCS wird das Elektromyogramm (EMG) je nach Ort der Stimulation an den entsprechenden Muskeln der Extremitäten oder des Gesichts aufgezeichnet. **Abb. 4** zeigt DCS im Rahmen einer Resektion. Ziel ist es zunächst einen Zugang zum Tumor zu wählen, welcher die motorische Funktion schont. Im weiteren Verlauf der Resektion ermöglicht das Mapping, den Tumorrand vom motorisch eloquenten Gewebe abzugrenzen und so eine möglichst vollständige Resektion zu erreichen.

Identifizierung von Nervenbahnen

Die direkte Nervenstimulation (DNS) ermöglicht es, die Lage von Nervenbahnen zu bestimmen und ihren Verlauf zu verfolgen. Der Chirurg stimuliert kathodal mit einer Hand-Elektrode. Diese Technik kommt bei subkortikalen Tumoren in der Nähe der Pyramidenbahn zur Anwendung [33]. Bei Eingriffen im Bereich des Sinus Cavernosus werden die Hirnnerven III, IV und VI gemappt um die Okulomotorik zu überwachen. Häufig ist die Stimulation der Hirnnerven bei Eingriffen im Bereich der Schädelbasis. Insbesondere bei Vestibularis-Schwannomen ermöglicht DNS den Funktionserhalt des N. facialis. Eingriffe am Hirnstamm benötigen ein sehr aufwändiges Monitoring und

Mapping. Bei Läsionen im Bereich des Hirnstamms können die Pyramidenbahn und mehrere Hirnnerven auch beidseits gefährdet sein. Eine Studie an unserer Klinik hat gezeigt, dass die Lokalisation der Fazialiskerne eine grosse Variabilität aufweist, welche durch die Anwesenheit einer Läsion noch verstärkt ist [34]. Dieses Ergebnis betont die Wichtigkeit der DNS, weil mithilfe der DNS anatomische Zusammenhänge an die Situation beim jeweiligen Patienten angepasst werden können.

Bei Eingriffen am Rückenmark besteht gleichermassen die Notwendigkeit, Nervenwurzeln mithilfe von DNS die Nervenwurzeln zu identifizieren und vom Tumorgewebe abzugrenzen. **Abb. 5** zeigt DNS bei der Extirpation eines Schwannoms. Zu Beginn der Operation unterstützt DNS das Auffinden der betroffenen Nervenwurzel. Im weiteren Verlauf wird DNS angewendet um die Nervenwurzel gegenüber dem Tumorgewebe abgrenzen und somit zum Funktionserhalt bei zu tragen.

Fazit für die Praxis

Bei neurochirurgischen Eingriffen, welche motorisch eloquentes Gewebe gefährden, ist intraoperatives Monitoring (insbesondere MEP) und Mapping (DNS, DCS) unerlässlich. Zu den kritischen Gebieten zählen der motorische Kortex, die Stammganglien, der Hirnstamm und das Rückenmark. Das Monitoring der sensorischen Bahnen (SEP) überwacht zum einen deren Funktion, zum anderen auch indirekt mechanische Belastung und die Blutversorgung des Gewebes. SEP werden deswegen auch gerne bei cerebrovaskulären Eingriffen eingesetzt.

Insgesamt erhöht IONM die Sicherheit während der Operation in dem Sinne, dass neurologische Ausfälle beim Patienten vermieden werden können. Insofern gibt Monitoring dem Neurochirurgen eine Bestätigung des gewählten chirurgischen Vorgehens und unterstützt damit eine radikalere Resektion, welche wiederum die Überlebensdauer der Patienten verbessert. Durch Verkürzung der Operationsdauer können auch Patienten mit schlechtem Allgemeinzustand und erhöhtem Anästhesierisiko einer Operation zugeführt werden. Gleichermassen werden komplizierte neurochirurgische Eingriffe, welche mit einem grossen operativen Risiko von neurologischen Ausfällen behaftet sind, durch IONM erst ermöglicht. Bei fachgerechter Auswahl der verwendeten IOM-Verfahren für die entsprechenden operativen Eingriffe leistet IONM erwiesenermassen einen Beitrag zu verbessertem Outcome in der Neurochirurgie. Aus diesen Gründen ist IONM heutzutage ein unverzichtbares Element bei einer Vielzahl neurochirurgischer Eingriffe geworden.

Danksagungen

Wir danken Elvira Ciessynna für Hilfe bei der Aufarbeitung der Daten für die Abbildungen, den Entwicklern der Firma Inomed für die Berücksichtigung unserer Wünsche, Dr. Marian Neidert für Kommentare zu einer früheren Version des Manuskriptes und Dr. Colette Boëx für die Übersetzung der Zusammenfassung.

Bibliographie

1. Stöhr M, Pfadenhauer K, Schleglmann K, Wagner W, editors. Neuromonitoring. Darmstadt: Steinkopff; 1999.
2. Møller AR. Intraoperative neurophysiological monitoring. 2nd ed: Humana; 2006.
3. Nuwer MR, editor. Intraoperative Monitoring of Neural Function. Amsterdam: Elsevier; 2008.
4. Simon M, Neuloh G, von Lehe M, Meyer B, Schramm J. Insular gliomas: the case for surgical management. J Neurosurg. 2009 Apr;110(4):685-95.
5. Chang EF, Clark A, Smith JS, Polley MY, Chang SM, Barbaro NM, et al. Functional mapping-guided resection of low-grade gliomas in eloquent areas of the brain: improvement of long-term survival. J Neurosurg. 2010 Jul 16.
6. Stummer W, Reulen HJ, Meinel T, Pichlmeier U, Schumacher W, Tonn JC, et al. Extent of resection and survival in glioblastoma multiforme: identification of and adjustment for bias. Neurosurgery. 2008 Mar;62(3):564-76; discussion -76.
7. Talacchi A, Turazzi S, Locatelli F, Sala F, Beltramello A, Alessandrini F, et al. Surgical treatment of high-grade gliomas in motor areas. The impact of different supportive technologies: a 171-patient series. J Neurooncol. 2010 Dec;100(3):417-26.
8. Mortini P, Losa M, Pozzobon G, Barzaghi R, Riva M, Acerno S, et al. Neurosurgical treatment of craniopharyngioma in adults and children: early and long-term results in a large case series. J Neurosurg. 2011 Jan 7.
9. Simpson D. The recurrence of intracranial meningiomas after surgical treatment. J Neurol Neurosurg Psychiatry. 1957 Feb;20(1):22-39.
10. Sala F, Krzan MJ, Deletis V. Intraoperative neurophysiological monitoring in pediatric neurosurgery: why, when, how? Childs Nerv Syst. 2002;18(6-7):264-87.
11. Sala F, Palandri G, Basso E, Lanteri P, Deletis V, Faccioli F, et al. Motor evoked potential monitoring improves outcome after surgery for intramedullary spinal cord tumors: a historical control study. Neurosurgery. 2006 Jun;58(6):1129-43; discussion -43.
12. Krayenbühl N, Sarnthein J, Oinas M, Erdem E, Krisht AF. MRI-validation of SEP monitoring for ischemic events during microsurgical clipping of intracranial aneurysms. Clin Neurophysiol. 2011 Sep;122(9):1878-82.
13. Szelenyi A, Langer D, Kothbauer K, De Camargo AB, Flamm ES, Deletis V. Monitoring of muscle motor evoked potentials during cerebral aneurysm surgery: intraoperative changes and postoperative outcome. J Neurosurg. 2006 Nov;105(5):675-81.
14. Wess C, Sarnthein J, Krayenbühl N, Scholz M, Kunze E, Meixensberger J. Spectral iEEG markers precede SSEP events during surgery for subarachnoid hemorrhage. Clin Neurophysiol. 2010 Dec;121(12):2172-6.
15. Sutter M, Eggspuehler A, Grob D, Jeszenszky D, Benini A, Porchet F, et al. The diagnostic value of multimodal intraoperative monitoring (MIOM) during spine surgery: a prospective study of 1,017 patients. Eur Spine J. 2007 Nov;16 Suppl 2:S162-70.
16. Sutter M, Eggspuehler A, Muller A, Dvorak J. Multimodal intraoperative monitoring: an overview and proposal of methodology based on 1,017 cases. Eur Spine J. 2007 Nov;16 Suppl 2:S153-61.

17. Neuloh G, Pechstein U, Cedzich C, Schramm J. Motor evoked potential monitoring with supratentorial surgery. *Neurosurgery*. 2004 May;54(5):1061-70; discussion 70-2.
18. Szelenyi A, Hattingen E, Weidauer S, Seifert V, Ziemann U. Intraoperative motor evoked potential alteration in intracranial tumor surgery and its relation to signal alteration in postoperative magnetic resonance imaging. *Neurosurgery*. 2010 Aug;67(2):302-13.
19. Neuloh G, Bogucki J, Schramm J. Intraoperative preservation of corticospinal function in the brainstem. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2009 Apr;80(4):417-22.
20. Sarnthein J, Bozinov O, Melone AG, Bertalanffy H. Motor-evoked potentials (MEP) during brainstem surgery to preserve corticospinal function. *Acta Neurochir (Wien)*. 2011 Sep;153(9):1753-9.
21. Wiedemayer H, Fauser B, Sandalcioğlu IE, Schafer H, Stolke D. The impact of neurophysiological intraoperative monitoring on surgical decisions: a critical analysis of 423 cases. *J Neurosurg*. 2002 Feb;96(2):255-62.
22. Kodama K, Goto T, Sato A, Sakai K, Tanaka Y, Hongo K. Standard and limitation of intraoperative monitoring of the visual evoked potential. *Acta Neurochir (Wien)*. 2010 Apr;152(4):643-8.
23. Neuloh G, Pechstein U, Schramm J. Motor tract monitoring during insular glioma surgery. *J Neurosurg*. 2007 Apr;106(4):582-92.
24. MacDonald DB. Intraoperative motor evoked potential monitoring: overview and update. *J Clin Monit Comput*. 2006 Oct;20(5):347-77.
25. Szelenyi A, Kothbauer KF, Deletis V. Transcranial electric stimulation for intraoperative motor evoked potential monitoring: Stimulation parameters and electrode montages. *Clin Neurophysiol*. 2007 Jul;118(7):1586-95.
26. Deletis V, Isgum V, Amassian VE. Neurophysiological mechanisms underlying motor evoked potentials in anesthetized humans. Part 1. Recovery time of corticospinal tract direct waves elicited by pairs of transcranial electrical stimuli. *Clin Neurophysiol*. 2001 Mar;112(3):438-44.
27. Deletis V, Rodi Z, Amassian VE. Neurophysiological mechanisms underlying motor evoked potentials in anesthetized humans. Part 2. Relationship between epidurally and muscle recorded MEPs in man. *Clin Neurophysiol*. 2001 Mar;112(3):445-52.
28. Kothbauer KF, Deletis V, Epstein FJ. Motor-evoked potential monitoring for intramedullary spinal cord tumor surgery: correlation of clinical and neurophysiological data in a series of 100 consecutive procedures. *Neurosurg Focus*. 1998 May 15;4(5):e1.
29. Sala F, Manganotti P, Tramontano V, Bricolo A, Gerosa M. Monitoring of motor pathways during brain stem surgery: what we have achieved and what we still miss? *Neurophysiol Clin*. 2007 Dec;37(6):399-406.
30. Taniguchi M, Cedzich C, Schramm J. Modification of cortical stimulation for motor evoked potentials under general anesthesia: technical description. *Neurosurgery*. 1993 Feb;32(2):219-26.
31. Szelenyi A, Joksimovic B, Seifert V. Intraoperative risk of seizures associated with transient direct cortical stimulation in patients with symptomatic epilepsy. *J Clin Neurophysiol*. 2007 Feb;24(1):39-43.
32. Romstöck J, Fahlbusch R, Ganslandt O, Nimsky C, Strauss C. Localisation of the sensorimotor cortex during surgery for brain tumours: feasibility and waveform patterns of somatosensory evoked potentials. *J Neurol Neurosurg Psychiatry*. 2002 Feb;72(2):221-9.
33. Szelenyi A, Senft C, Jordan M, Forster MT, Franz K, Seifert V, et al. Intra-operative subcortical electrical stimulation: A comparison of two methods. *Clin Neurophysiol*. 2011 Jul;122(7):1470-5.
34. Bertalanffy H, Tissira N, Krayenbühl N, Bozinov O, Sarnthein J. Inter- and Inpatient Variability of Facial Nerve Response Areas in the Floor of the Fourth Ventricle. *Neurosurgery*. 2011 Mar;68(3):23-31.

Bildlegenden

Abbildung 1. Die IOM-Messungen werden unmittelbar ausgewertet um dem Operateur Entscheidungshilfen in Echtzeit zu bieten.

Abbildung 2. (A) Stimulation des N. medianus am Handgelenk. (B) Ableitung der Sensorisch Evozierten Potentiale (SEP) an der Kopfhaut. (C) Normgerechte SEP-Antwort. (D) SEP-Antwort im intraoperativen Verlauf: 12:17 Normales SEP Signal; 12:22 Verminderte SEP gemeldet, Chirurg reagiert auf Warnung und behebt Durchblutungsstörung; 12:32 SEP Antwort erholt sich; 12:40 normgerechte SEP-Antwort.

Abbildung 3. (A) Stimulation des motorischen Kortex an der Kopfhaut (Transkranielle elektrische Stimulation, TES). (B) Ableitung der Motorisch Evozierten Potentiale (MEP) an den Muskel des Thenar. (C) Normgerechte MEP-Antwort in den Muskeln des Thenar. Die 5 Pulse im Abstand von 4 ms entstehen als Artefakt der Stimulation. (D) MEP-Antworten abgeleitet am M. flexor hallucis brevis während des Clipping eines Giant-Aneurysmas. Nach Abflachen des MEP um 19:38 führte Kontrolle des Bypass, Blutdruckerhöhung und erhöhte Stimulationsintensität zur Wiederherstellung der MEP, wenn auch mit reduzierter Amplitude.

Abbildung 4. Direkte Kortikale Stimulation (DCS) zur Identifikation des Motorischen Kortex. (A) Gliom WHO° III in der Zentralregion (B) Stimulation mit Hand-Elektrode im Operationsfeld (C) Selektive Antwort der Muskeln des Thenar.

Abbildung 5. Direkte Stimulation der Nervenwurzeln. (A) Axiales MRI auf Höhe C7. (B) Stimulation mit Hand-Elektrode im Operationsfeld (C) Muskelantwort des Triceps.